

DOI: 10.11779/CJGE201601018

基于动力触探的砾性土液化判别方法通用性研究

曹振中¹, 刘荟达¹, 袁晓铭¹, T Leslie Youd²

(1. 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 杨百翰大学土木与环境工程系, 普若佛 84602, 美国)

摘要: 动力触探是针对砾性土力学性能评价的一种原位测试技术, 具有设备简单、操作方便等优势。分别在成都平原和美国 Utah 地区选取典型砾性土地, 进行中美联合动力触探和有效锤击能量的测试与标定, 结果表明: ①在成都平原 3 个砾性土地获取了中国超重型动力触探 1321 个重锤锤击能量记录, 锤击能量传递系数的平均值约为 90%, 标准差为 7.7%, 锤击数离散性受设备操作方法的影响较大; ②在美国钻机安装中国超重型动力触探标准探头, 可以有效穿透选取的试验深度为 20 m 的砾性土地, 并进行分层、力学性能评价; ③在美国 Echo dam 下游坝基上 2 个砾性土地获取了美国动力触探 1438 个重锤锤击记录, 锤击能量传递系数约为 74%, 标准差为 8.7%, 锤击数离散性受拉绳、钻杆摩擦力的影响较大; ④对锤击数进行能量修正之后, 以 2008 年汶川地震砾性土液化为背景、以动力触探锤击数为基本指标的砾性土液化判别方法, 具有国际通用的可行性。

关键词: 动力触探; 砾性土液化; 能量修正; 判别方法; 通用性

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)01-0163-07

作者简介: 曹振中(1982-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: iemcz@163.com。

Reliability of Chinese dynamic penetration test for liquefaction evaluation of gravelly soils

CAO Zhen-zhong¹, LIU Hui-da¹, YUAN Xiao-ming¹, T Leslie Youd²

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration, Institute of Engineering

Mechanics, CEA, Harbin 150080, China; 2. Dep of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University, Provo 84602, USA)

Abstract: Chinese Dynamic penetration test (DPT) is an in-situ testing with the advantages of simple apparatus, economical test, and continuous data acquisition, especially for measuring bearing capacity, relative density and classification of gravelly soils. The typical gravelly soils sites are selected from the Chengdu Plain in China and the river bed of Echo dam downstream in the U.S., and China-US dynamic penetration testing and hammer energy measurements are conducted. The results show that: (1) The average of energy transfer ratios is 90% and the standard deviation is 7.7%, derived from 1321 energy time-history records, tested at 3 gravelly soils sites in the Chengdu Plain. The deviation is greatly affected by operation procedure. (2) The DPT test depth, using US drill rig assembling with Chinese DPT cone, can reach as much as 20 meters for assessing soil properties. (3) The average of energy transfer ratios is around 74% and the standard deviation is 8.7%, derived from 1438 energy time-history records, tested at 2 gravelly soils sites on the river bed of Echo dam downstream. The deviation is greatly affected by friction of drill rod and rope. (4) The DPT blows should be corrected according to different hammer energies. The proposed evaluation method for gravelly soils liquefaction, developed from the DPT database of gravelly soils liquefied during 2008 Wenchuan Earthquake, can be applicable for worldwide use.

Key words: dynamic penetration test; gravelly soils; energy correction; liquefaction evaluation method; reliability

0 引言

目前学术界和工程界在对宽级配的粗粒土定义并不统一和清晰, 一方面客观上土的组成较为复杂, 另一方面各行业应用目标也不同。2005 年版《地球科学大辞典》给出了砾砂、砾质土、粉砾土、砂砾土和砾类土以及粗粒土的具体解释^[1], 2008 年汶川地震现场

获取的液化土的砾粒含量(粒径大于 5 mm)在 20%~77%^[2], 进行土类命名时, 从现有的规范、手册中很

基金资助: 国家自然科学基金项目(51208477, 41272357); 黑龙江省自然科学基金项目(2014GXNSFB118257)

收稿日期: 2014-12-16

*通讯作者

难找到一个合适的名称与之对应, 由于其含砾量的范围较宽, 为了与宽级配的黏性土、砂性土相对应, 笔者将其命名为砾性土, 并定义为由卵石、砾、砂、粉粒、黏粒等部分或全部组成的宽级配土, 含砾量可从 0% 变化至 80% 甚至更高。

2008 年汶川地震以前, 中国历史地震中的砾性土液化实例仅有 2, 3 例, 全球实例也不超过 10 例, 砾性土液化问题并未引起足够重视。2008 年汶川地震中发现液化实例 118 例, 其中 70% 为砾性土液化^[3], 调查结果表明, 砾性土液化在震动强度较大、排水条件不畅的条件下发生液化的可能性较大。然而, 目前关于砾性土液化产生的条件、机理、控制因素、抗液化强度以及判别方法等问题存在较大的争议。

关于可能发生液化的土类, Tsuchida 根据历史地震中液化土及非液化土的筛分试验结果, 给出了可液化土及最易液化土的颗粒级配分布边界, 可能液化土的最大平均粒径为 2.1 mm^[4]。汪闻韶等通过对密云水库白河大坝的砂砾料进行三轴试验, 指出砂砾料的含砾量达到 70% 时, 砾性土则很难液化^[5]。Kazama 等指出砾性土的含量最多可高达 80%^[6]。以往历史地震砾性土液化资料表明, 大多数的可液化砾性土为砂土、砾石的混合料^[7]。针对砾性土的液化特性及抗液化强度, 不少学者开展了一系列的大直径动三轴试验, 然而, 相关结论却很难达成一致, 甚至相互矛盾^[7-11]。室内试验特别是大直径动三轴试验是研究砾性土液化特性、机制的重要手段, 但受到取样难度、尺寸限制、橡皮膜嵌入效应等的影响, 直接将相关的研究成果应用于工程实践还存在较大的差距。

现行规范或手册中的砂土液化判别公式, 几乎都是根据现场测试指标建立起来的, 建立新的砾性土液化判别方法也应侧重于现场指标, 采用现场测试技术评价土体力学性能是发展趋势。本文在成都平原选取 3 个典型砾性土液化场地进行超重型动力触探测试、锤击能量测定, 并与美国杨百翰大学、美国内政部垦务局合作, 在美国 Utah 州的 Echo 水库大坝下游坝基上选取 2 个砾性土场地, 将中国超重型动力触探试验探头安装在美国常规钻机上进行动力贯入试验、锤击能量测试, 努力将中国超重型动力测试技术及新提出的砾性土液化评价方法进行国际推广。

1 动力触探砾性土液化判别公式

对于砾性土场地, 标准贯入试验、静力触探试验等工程上常规测试手段无法进行, 动力触探试验是一种主要针对砾性土极限承载力、压缩模量等的原位测试手段, 具有操作简单、快速经济、应用历史悠久、

能连续测试等明显优势, 相关规范均有较详细的介绍。

尽管超重型动力触探推广、普及近 50 余年, 但主要用于砾性土的岩土工程勘察及地基承载力评价, 笔者第一次根据 2008 年汶川地震砾性土场地超重型动力触探测试, 建立了砾性土液化评价方法^[12], 并给出了抗液化强度 CRR 的计算公式^[13], 评价方法、计算公式简单明了、可靠性强, 原文中均有较详细的论述。

$$CRR = \exp \left[\frac{1}{2.12} (\ln [P_L / (1 - P_L)] - 8.40 + 0.35 N'_{120}) \right], \quad (1)$$

式中, N'_{120} 为修正至上覆有效压力为 100 kPa 时的修正超重型动力触探击数, P_L 为液化概率。

超重型动力触探临界判别曲线见图 1。

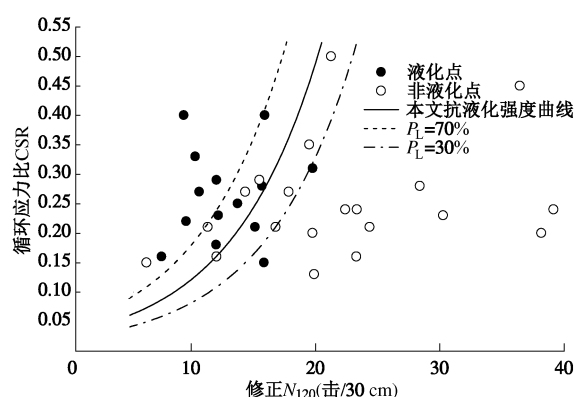


图 1 超重型动力触探临界判别曲线^[13]

Fig. 1 Probabilistic liquefaction triggering curves for gravelly soils

2 动力触探锤击数能量修正的必要性

采用重锤锤击的原位测试技术, 受测试设备、操作人员、钻杆、重锤重量与落距等的影响较大, 需要进行相应的修正才能进行相应的工程应用。我国往往采用对杆长修正的方式, 而国际上则采用锤击能量修正, 为了能与国际接轨, 对超重型动力触探击数进行能量修正。

采用能量测试设备对中国超重型动力触探试验的有效锤击能量进行测试、标定有两个目的: 首先, 正是由于超重型动力触探试验设备简单, 测试手段、过程略显粗糙, 测试过程中钻杆的垂直需要工人人力去维持 (图 2), 不同工人操作的重锤提升速度不同, 加上设备系统本身的摩擦阻力, 这些都直接影响到重锤的有效锤击能量, 进而影响到测试结果。目前中国超重型动力触探有效锤击能量尚不清楚, 测试结果的不确定性较大, 应用主要是以经验为主缺少理论指导, 精度缺乏验证难以进一步完善和改进。其次, 由于各国所使用的重锤和落距标准不同, 缺少关键的转换技术即锤击能量标定, 中国超重型动力触探这一技术目前无法被国外使用, 测试结果不可通用, 标准贯入试

验结果国际上可通用的原因之一是进行了有效锤击能量的标定^[14], 若其他国家或地区采用中国超重型动力触探试验的标准探头, 安装在他们自己国家的普通钻机上, 测试结果进行有效锤击能量标定后, 可直接采用中国的动力触探研究成果, 有利于中国超重型动力触探测试技术向国际推广。因此, 要进行推广不仅需要测定中国超重型动力触探的锤击能量, 还需要获取其他国家的重锤有效锤击能量。



图 2 中国超重型动力触探重锤传递能量测试

Fig. 2 DPT apparatus with hammer falling to impact anvil above PDA energy measuring device

3 中美动力触探锤击能量测定

为了研究中国超重型动力触探的可靠性以及国际通用的可能性, 与美国杨百翰大学、美国内政部垦务局合作, 分别在成都平原选取 3 个典型砾性土液化场地、美国 Echo dam 下游坝基上选取 2 个砾性土场地, 通过中美联合动力触探和有效锤击能量的测试与标定。以汶川地震砾性土液化场地超重型动力触探试验为基础, 获取锤击有效能量比数据, 建立动力触探的锤击数修正系数, 使提出的砾性土液化预测方法可以在其他国家应用, 构造出砾性土主要力学性能评价的国际通用技术。

(1) 成都平原砾性土场地锤击能量测定

在成都平原选取的 3 个砾性土液化场地分别为成都市新都县龙桥镇肖家村 (CD10-5RY)、都江堰市唐昌镇金星村 (CD10-10) 和都江堰市聚源镇泉水村 (CD10-11)。锤击能量测试设备为美国垦务局提供的 (PDI, Pile Dynamics Inc.) 能量测试仪器 Pile Driving Analyzer, 配备有一根长 0.6 m 直径 65 mm 的连接杆 (图 3), 连接杆对称两侧分别安装 2 个应变传感器、2 个加速度传感器, 安装有应变、加速度传感器的连接杆安装在重锤与钻杆之间, 测定重锤传递给钻杆的

能量。

美国 PDI 公司的连接杆直径为 65 mm, 而中国超重型动力触探试验钻杆直径为 60 mm, 测试有效锤击能量时, 需机械加工转接接头将 PDI 连接杆上端与承受重锤锤击的铁砧连接, 下端与直径 60 mm 的普通钻杆连接。

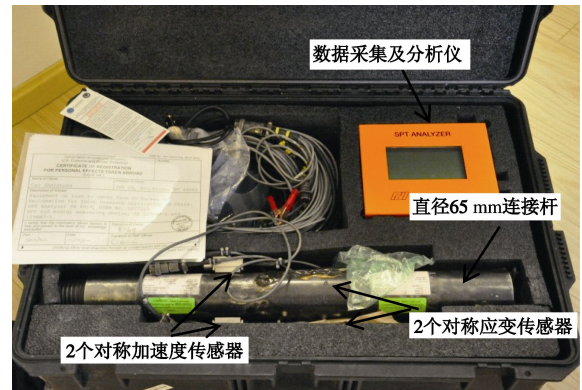


图 3 美国 PDI 公司的有效能量测试仪 Pile Driving Analyzer (美国垦务局提供)

Fig. 3 Pile driving analyzer for measurement of hammer effective energy

安装在连接杆上的应变、加速度传感器, 每一锤击后可直接测定连接杆上产生的力和速度时程曲线 (图 4), 图 4 中虚线为连接杆上获取的速度时程曲线, 实线为力时程曲线, 有几个重要的符号需要说明, BN 表示锤击编号, LP 表示试验点的深度, LE 表示钻杆的总长度, EF0 表示理论总能量, ETR 表示能量传递系数。力与位移的乘积表示功 (能量), 重锤传递给钻杆的能量可根据时程曲线积分得到

$$EMX = \int_a^b F(t) \cdot V(t) dt \quad (2)$$

式中, EMX 为传递给钻杆的能量, $F(t)$ 为力时程曲线, $V(t)$ 为速度时程曲线, a 为能量传递开始时间, b 为能量传递结束时间。

锤击能量传递系数 (ETR, energy transfer ratio) 定义为: 传递给钻杆的能量与重锤的理论总能量之比, 直接用于修订采用不同有效锤击能量及落距获取的贯入击数。传递给钻杆的能量即有效能量, 由 PDI 有效能量测试仪直接测定, 重锤的理论总能量为重锤的重量乘以落距, 即理论总势能。超重型动力触探重锤质量为 120 kg, 落距为 1m, 因此, 理论总能量为 1.2 kN·m。

在超重型动力触探正常试验的同时, PDI 数据采集系统自动记录每一落锤所产生的有效能量, 在 3 个典型场地上共获取了 1321 个锤击能量数据, 其中 CD10-5RY (737 个)、CD10-10 (458 个) 场地上采用正常的锤击速率 15-30 击/min, 锤击能量传递系数 ETR 平均值分别为 88%, 91%, 标准差 σ 分别为 6.9%, 8.6%。图 5 给出了 CD10-5RY 锤击能量传递系数的分布规律。

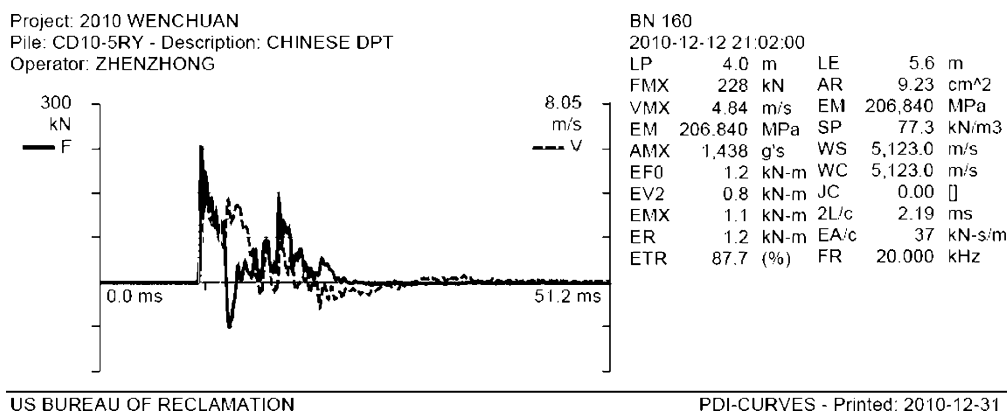


图4 每一次锤击自动获取的有效能量传递比 ETR

Fig. 4 Auto data acquisition by pile driving analyzer

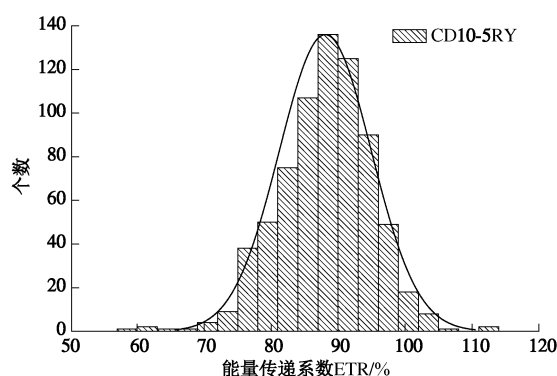


图5 场地 CD10-5RY 锤击能量传递系数分布规律

Fig. 5 Frequency diagrams showing number of hammer drops with

ETR values in 2% bins from CD10-5RY

从图5可以看出,将近40(共700次)锤击的有效传递能量比超过100%,即重锤传递给钻杆的能量超过重锤所具有的总能量,理论上不应该出现这种情况。仔细观察超重型动力触探试验发现,测试过程中由于锤击速率过快,导致重锤在提升过程中速度较快,在重锤提升到导向杆的最高处仍具有一定的初速度,重锤的实际落距超过100 cm的理论值,因此总的能量有所增加,进而计算的有效锤击能量比有所偏大,甚至出现超过100%的情况。为了查明重锤提升速度对ETR的影响,另外专门选取了一个场地CD10-11(126个)进行了有效锤击能量测试,此时要求重锤以缓慢的速度提升,测试统计结果如图6。结果表明,采用缓慢锤击速率测试结果的离散性减少,有效传递能量比ETR为85%,标准差为2.9%,明显低于正常锤击速率测试时7%的标准差。

CD10-10, CD10-5RY, CD10-11等3个场地进行超重型动力触探试验时,有效能量是在不同贯入深度获取的,有效传递能量比随贯入深度的增加而增加,如图7。两者之间拟合线性关系为

$$\text{ETR} = 0.99 \cdot \text{LP} + 82.1, \quad (3)$$

式中,ETR为能量传递系数(%),LP为测试点深度

或贯入深度。

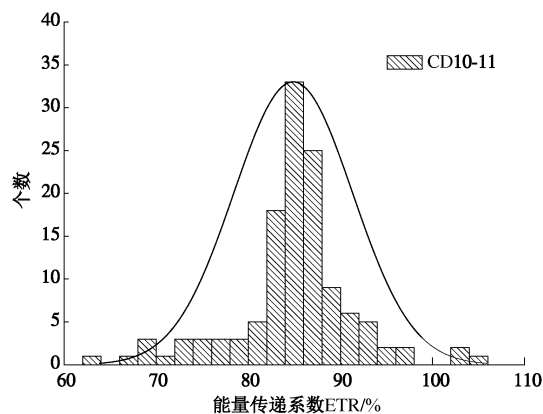


图6 缓慢锤击速率下的有效锤击能量比分布规律

Fig. 6 Frequency diagrams showing number of hammer drops with

ETR values in 2% bins from CD10-11 at a drop rate < 15

blows/min to prevent hammer rising above 1.00 m

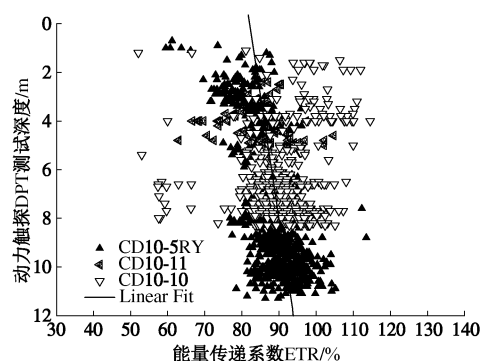


图7 能量传递系数与贯入深度的关系

Fig. 7 Correlation between effective transfer ratio and depth of penetration

超重型动力触探测试时,浅层的砾性土较松散,每一锤击的贯入度较大,重锤与铁砧碰撞后,重锤、连接杆、钻杆速度较大,会分担一部分的动能,因此连接杆上应变产生的弹性、速度产生的动能相对较小。另一方面,浅层贯入时,钻杆晃动较大,也会导

致浅层的有效锤击能量相对较小。

(2) 美国动力触探锤击能量测定

在美国选取的砾性土地位于美国中西部 Utah 州 Salt Lake City 北部的 Echo dam 下游坝基上, Echo dam 于 1927-1931 修建的土石坝, 位于 Echo 的上游 1.6 km、Coalville 以北 10 km 处, 坝高 158 ft(48.2 m), 1,540,000 yd³ (1178100 m³) 土石方, 泄洪能力 15000 ft³/s (424.5 m³/s), 流域面积 836 mile² (2165 km²)。测试探头采用中国 DPT 标准探头, 钻杆直径 65 mm, 较中国钻杆直径 60 mm 稍大, 重锤采用美国常规钻机上的 136.2 kg 自由落体重锤 (300 lb safety hammer), 落距为 76 cm, 美国重锤理论总能量为 1.035 kN·m。

美国常规钻机采用的 136.2 kg 重锤, 试验时将提升用的粗麻绳绕在钻机的卷扬机上 2 圈, 麻绳一端通过钻机顶端的滑轮连接重锤, 麻绳的另一端需要钻机工人拉住, 等到重锤提升到设定高度时 (76 cm), 钻机工人将麻绳一松手, 重锤自由落体锤击钻杆顶端的铁砧, 这样一拉一放即完成一次锤击试验 (图 8)。由于重锤自由落体时带着麻绳一起运动, 麻绳与滑轮、卷扬机存在摩擦, 麻绳在卷扬机上绕的圈数, 均对有效锤击能量有较大影响, 由于麻绳摩擦力的影响, 美国 300lb safety hammer 重锤测试的能量传递系数相对较小, 对获取 1438 个数据进行统计得到, 采用中国超重型触探标准探头、美国 65 mm 钻杆、美国 300lb safety hammer 重锤, 获得的能量传递系数平均值为 74.4%, 标准差为 8.7% (图 9)。



图 8 中国超重型动力触探在美国 Echo dam 推广试验
Fig. 8 China's DPT tested at Echo dam gravelly soils site in U.S.

(3) 动力触探锤击数能量修正方法

成都平原 3 个砾性土地 1321 个有效锤击能量记录和 Echo dam 2 个砾性土地 1438 个有效锤击能量记录的统计结果表明 (表 1), 中国超重型动力触探自动脱钩落锤式高于美国拉绳式的有效锤击能量传递,

离散性较为接近。

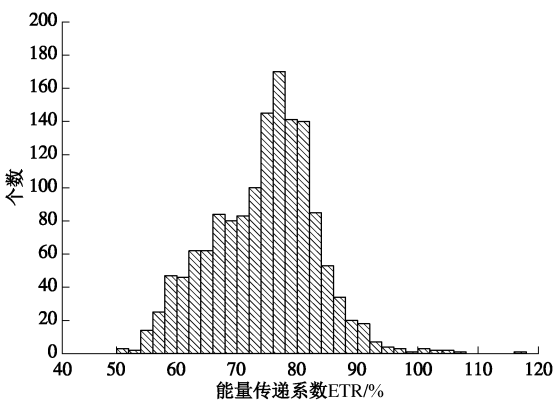


图 9 美国 Echo dam 场地有效锤击能量比分布规律
Fig. 9 Frequency diagrams showing number of hammer drops with ETR values from DPT-10-1 and DPT-10-2 at Echo dam in U.S.

表 1 有效锤击能量统计结果

Table 1 Statistics of energy transfer ratios tested at Chengdu Plain and Echo dam				
编号	记录个数	传递系数均值/%	标准差/%	备注
CD10-5RY	737	88	6.9	重锤理论总能量 1.2 kN·m
CD10-10	458	91	8.6	
CD10-11	126	85	2.9	
DPT-10-1	941	73	9.1	重锤理论总能量 1.035 kN·m
DPT-10-2	497	76	7.4	

中国 DPT 标准探头、120 kg 重锤、100 cm 自由落距的有效传递能量比约 90%, 已经建立的基于超重型动力触探砾性土液化判别公式 (式 (1)) 及中国近 50 余年超重型动力触探积累的图表、经验, 均是在有效传递能量比约为 90% 这一标准下获取的锤击数据, 若采用超重型动力触探 120 kg 重锤, 测试得到的锤击数不需要进行能量修正。若采用其他不同锤击能量重锤, 则需测定所使用重锤的传递能量, 按 120 kg 重锤的理论总能量计算传递能量比, 借鉴标准贯入试验能量修正的基本思路, 并按下式进行能量修正:

$$N_{m-120} = \frac{ETR}{90} N_{120} \quad (4)$$

式中 N_{m-120} 为经能量修正后的每贯入 30 cm 的锤击数, 即经能量修正的动探击数; ETR 为能量传递系数 (%), 理论总能量按 1.2 kN·m 计算; N_{120} 为采用中国超重型动力触探标准探头现场实测每贯入 30 cm 的锤击数, 即实测动探击数。

采用中国 DPT 标准探头、美国 300lb safety hammer 重锤在 Echo dam 的试验, 其理论总能量 1.035 kN·m 下的能量传递系数为 74%, 因此, 在 Echo dam 获取的超重型动力触探击数修正至理论总能量为 1.2 kN·m 下的击数:

$$N_{m-120} = \frac{ETR}{90} N_{120} = 0.71 \cdot N_{120} \quad (5)$$

式中, N_{m-120} 为修正至理论总能量 $1.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 下的超重型动力触探击数, N_{120} 为采用中国 DPT 标准探头的实测动探击数。

修正后的 Echo dam 超重型动力触探击数曲线见图 10, 11。修正至理论总能量为 $1.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 下的超重型动力触探击数 N_{m-120} , 密实程度、极限承载力及变形模量等常规土性特征可参考中国规范相应的公式、图表等, 进行砾性土液化判别, 则可直接采用砾性土抗液化强度计算公式 (式 1)。

4 基于动力触探的砾性土液化判别方法通用性分析

美国中西部在上个世纪早期西部大开发的时候, 美国垦务局 (Bureau of Reclamation) 建造了大量的土石坝, 坝体及坝基由大量的砾性土组成, 受当时技术水平的限制, 土石坝在修建时碾压程度不够且未做稳定性分析和评价, 随着年代的久远, 土石坝的质量逐渐下降并出现较多隐患, 自 20 个世纪 90 年代至今, 美国垦务局花费了大量的人力、物力对土石坝进行稳定性评价, 而砾性土的土性、抗液化强度、动力特性是重要的评价内容之一。针对砾性土目前美国仍无简便、可靠的测试手段, 无奈之举是采用贝克贯入试验 (berker penetration tests, BPT) [15], 该试验设备笨重、操作复杂、造价昂贵, 试验方法未标准化, 应用推广较困难, 美方对 BPT 试验手段的评价是造价高、测试结果的不确定性大。为了检验中国超重型动力触探试验技术在美国推广的可能性, 选取 Echo dam 下游坝基的砾性土场地进行动力触探试验。

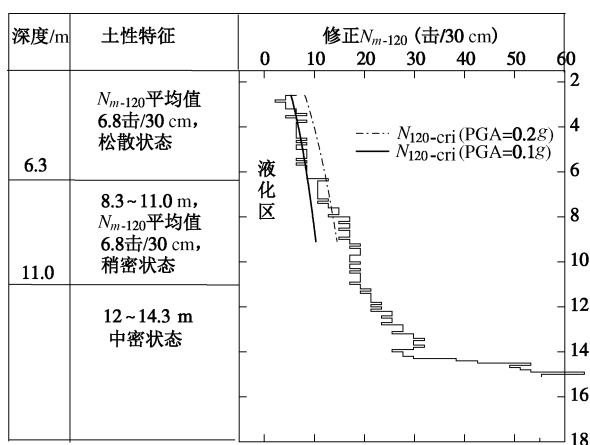


图 10 Echo dam DPT-10-1 密实程度及液化区判定结果

Fig. 10 Density classification and liquefaction prediction for DPT-10-1 by proposed method at different seismic shaking levels

本次 Echo dam 动力触探测试之前, 美国垦务局在水库下游坝基上进行了大量的钻探、测试, 从收集到的土层资料来看, 整个土层主要为砾砂、砾性土,

采用中国 DPT 探头、美国 300 lb 重锤, 在 Echo dam 砾性土场地上具有良好的适用性, 贯入深度达到将近 20 m。DPT-10-2 在深度 8, 10, 13 m 附近的超重型动力触探击数曲线突然增大往往是由于贯入探头遇到较大卵石, 卵石被击碎或挤开后, 继续贯入曲线即回归到正常值, 这些数据突然增大的异常值应剔除。测试结束后, 中国 DPT 探头上除有少量划痕外整体仍较完整。

如前所述, Echo dam 记录的动力触探击数, 由于重锤的理论总能量以及实测的能量传递系数均不同, 需根据式 (5) 进行能量修正, 然后可根据式 (1) 对砾性土层的液化可能性进行判别 (图 10, 11)。分别绘制临界超重型动力触探击数随深度的变化曲线, 可判定液化区域, 即当实测动探击数小于临界动探击数, 则可判为液化。DPT-10-1、DPT-10-2 的地下水位很深, 达到 18 m, 整个砾性土土层基本上处于地下水位以上, 没有进行液化判别意义。从动探曲线上可以看出, 这两个场地浅层砾性土处于松散状态, 一旦地下水位上升, 则发生液化的可能性急剧上升。假定地下水位均上升至 2.0 m 时, 分别绘制地表峰值加速度在 $0.1g$ 、 $0.2g$ 下的临界超重型动力触探击数分布曲线, $0.1g$ 时, DPT-10-1 浅层 2.0~6.3 m 的土层处于临界状态, 而 DPT-10-2 的软弱夹层 (砾性土) 4.7~6.5 m 落入液化区域, 当达到 $0.2g$ 时, DPT-10-1 浅层 2.0~6.3 m 的土层亦被划入液化区域。

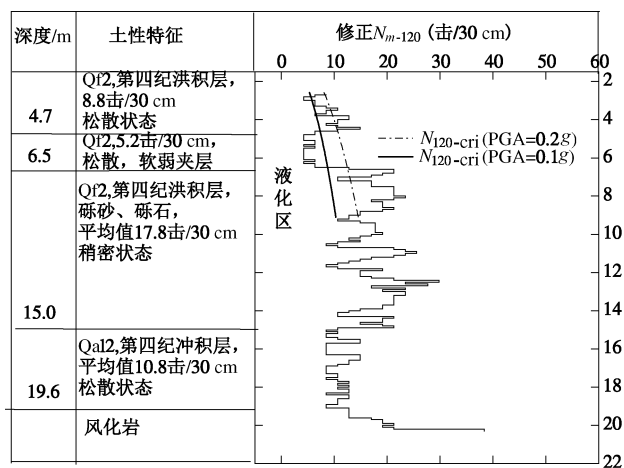


图 11 Echo dam DPT-10-2 密实程度及液化区判定结果

Fig. 11 Density classification and liquefaction prediction for DPT-10-2 by proposed method at different seismic shaking levels

5 结 论

分别在成都平原、美国 Echo dam 选取了典型砾性土场地, 通过中美动力触探联合测试、标定, 取得了以下认识:

(1)中国超重型动力触探自动脱钩落锤式有效锤击能量传递系数约 90%, 高于美国拉绳式的有效锤击能量传递系数 74%, 两者的离散性较为接近, 标准差 7%~8%。

(2)中国超重型动力触探锤击数受操作手段的影响较大, 重锤提升未到顶、提升速度过快, 使得重锤的实际落距低于或超过 100 cm 的理论值, 总的能量产生变化, 造成锤击数离散, 试验时需严格控制重锤提升速度。

(3)在美国钻机上安装中国超重型动力触探标准探头, 可以有效穿透选取的试验深度为 20 m 的砾性土场地, 并进行分层、力学性能评价, 中国超重型动力触探 (DPT) 具有设备简单、应用历史较长、测试数据连续的优点, 可作为砾性土液化预测的核心指标, 以此建立的砾性土液化判别方法具有较高的可靠性。

(4)美国 Echo dam 2 个砾性土场地的测试、检验结果表明, 若其他国家或地区采用中国超重型动力触探试验的标准探头, 进行有效锤击能量影响进行修正之后, 以 2008 年汶川地震砾性土液化为背景、以动力触探锤击数为基本指标的砾性土液化判别方法, 具有国际通用的可行性。

参考文献:

- [1] 地球科学大词典编委会. 地球科学大词典[M]. 北京: 地质出版社, 2005. (Earth Science Dictionary Committee. Earth science dictionary[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [2] 曹振中, 徐学燕, 袁晓铭. 国内外液化砂砾土土性对比分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, **32**(4): 481 - 487. (CAO Zhen-zhong, XU Xue-yan, YUAN Xiao-ming. Characteristics comparison of gravels that liquefied following the 2008 wenchuan and previous earthquakes[J]. J. of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, **32**(4): 481 - 487. (in Chinese))
- [3] CAO Z, YOUNG T L, YUAN X. Gravelly soils that liquefied during 2008 Wenchuan, China earthquake, Ms=8.0[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, 2011(31): 1132 - 1143.
- [4] TSUCHIDA H. Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits[C]// Seminar in the Port and Harbor Research Institute. Yokosuka: 1970: 1 - 33.
- [5] 汪闻韶, 常亚屏, 左秀泓. 饱和砂砾料在振动和往返加荷下的液化特性[C]// 水利水电科学研究院论文集(第 23 集). 北京: 水利出版社, 1986: 195 - 203. (WANG Wen-shao, CHANG Ya-ping, ZOU Xiu-hong. Liquefaction characteristics of saturated sand-gravels under vibration and cyclic loading[C]// Volume 23 collected papers of China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Beijing: China Waterpower Press, 1986: 195 - 203. (in Chinese))
- [6] KAZAMA M, SENTO N, OMURA H, et al. Liquefaction and settlement of reclaimed ground with gravelly decomposed granite soil[J]. Soil Foundation, 2003, **43**(3): 57 - 72.
- [7] EVANS Mark D, ZHOU Sheng-ping. Liquefaction behavior of sand-gravel composites[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **121**(3): 287 - 298.
- [8] WONG R T, SEED H B, CHAN C K. Liquefaction of gravelly soils under cyclic loading conditions[R]. California: University of California, 1974.
- [9] SIDDIQI F H. Strength evaluation of cohesionless soils with oversized particles[D]. Davis: University of California at Davis, 1984.
- [10] KOKUSHO T, TANAKA Y. Dynamic properties of gravel layers investigated by in-situ freezing sampling[C]// Geotech Spec Publ No56. New York: ASCE, 1994: 121 - 140.
- [11] KOKUSHO T, HARA T, HIRAOKA R. Undrained shear strength of granular soils with different particle gradations[J]. J Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 2004, **130**(6): 621 - 629.
- [12] 袁晓铭, 曹振中. 砂砾土液化判别的基本方法及计算公式[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(4): 509 - 519. (YUAN X, CAO Z. Fundamental method and formula for evaluation of liquefaction of gravel soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(4): 509 - 519. (in Chinese))
- [13] CAO Z, YOUNG T, YUAN X. Chinese dynamic penetration test for liquefaction evaluation in gravelly soils[J]. J of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2013, **139**(8): 1320 - 1333.
- [14] YOUNG T L, IDRIS I M, ANDRUS R D, et al. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(10): 817 - 833.
- [15] YOUNG T L, IDRIS I M, ANDRUS R D, et al. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(10): 817 - 833.